

Die Anwendung der computergestützten Tragwerksplanung von konstruktiven Ingenieurbauwerken im Zuge des Verkehrsprojektes Inter-City-Express 97

Dr.-Ing. W. Schleicher

Dipl.-Ing. M. Rieche

1 Einleitung

Die Entwicklung Berlins zur neuen Hauptstadt des vereinigten Deutschlands erfordert den umfangreichen Ausbau der innerstädtischen Verkehrswege und eine umfassende Einbindung in das bundesweite Verkehrsnetz. Durch die Vereinigung beider Teile von Berlin wurden gerade im Bereich des Bahnbaus erhebliche Sanierungsmaßnahmen an bestehenden Brücken bzw. deren Neubau erforderlich. Die überregionalen Verkehrsprojekte wie der Ausbau der Inter-City-Express-Strecke zwischen Hannover und Berlin bedingte eine Umplanung großer Streckenabschnitte der Deutschen Bahn AG.

Im Zeitalter der computergestützten Informationsverarbeitung sind gerade auf dem Gebiet der Tragwerksplanung konstruktiver Ingenieurbauten vielfältige Möglichkeiten gegeben. So ist bei der Planung von Brückenneubauten eine durchgehende computergestützte Konstruktion und Tragwerksplanung vom Vorentwurf bis hin zur Fertigung möglich. Weiterhin gestatten besondere Berechnungsmethoden bei speziellen Belastungsarten eine exaktere Schnittkraft- und Spannungsermittlung und dadurch eine dem wirklichen Tragverhalten entsprechende genauere Nachweisführung.

An Beispielen aus dem konstruktiven Ingenieurbau im Zuge der Sanierung der Berliner Stadtbahn wird die Anwendung moderner Rechentechnik und computergestützter Konstruktionsmethoden und Berechnungsverfahren diskutiert.

2 Eisenbahnüberführung über die Holzmarktstraße

2.1 Baubeschreibung

Die sich westlich dem Berliner Hauptbahnhof anschließende neue Gleisfelderweiterung verändert die Gleislage im Bereich der Eisenbahnüberführung über die Holzmarktstraße. Aus diesem Grund wird ein Brückenneubau an dieser Stelle erforderlich. Die Eisenbahnüberführung bestand 1995 noch aus vier eingleisigen, mehrteiligen, genieteten Stahlbrücken. Diese werden einschließlich der Auflagerbänke auf den Widerlagern und Teilen der Fundamente abgebrochen und durch eine neue viergleisige Stahlbrücke ersetzt. Das neue Bauwerk besteht aus einer im Grundriß unregelmäßigen, schiefwinkligen Deckbrücke. Der Überbau spannt über zwei Felder, wobei das Mittelaufgänger durch vier Massivpfeiler gebildet wird. Die durchschnittliche Gesamtlänge der Brücke beträgt etwa 57 m, die Breite in der westlichen Auflagerlinie 32 m und der östlichen 37 m. Die durchschnittliche Schiefwinkligkeit beträgt etwa 40°.

Der Überbau der Brücke wird in Stahl St 37 gefertigt. Aus statischer Sicht ist die Konstruktion ein Trägerrost mit 16 Hauptträgern und 17 Längsrippen sowie zu den Auflagerlinien annähernd parallel liegenden insgesamt 17 Querträgern. Alle Profile werden als offene Querschnitte ausgebildet. Die Endquerträger weisen mit 1350 mm die gleiche Bauhöhe wie die Hauptträger auf, der Mittelquerträger besitzt eine Höhe von 1600 mm. Die dazwischenliegenden Normalquerträger sind ungefähr halb so hoch wie die Hauptträger.

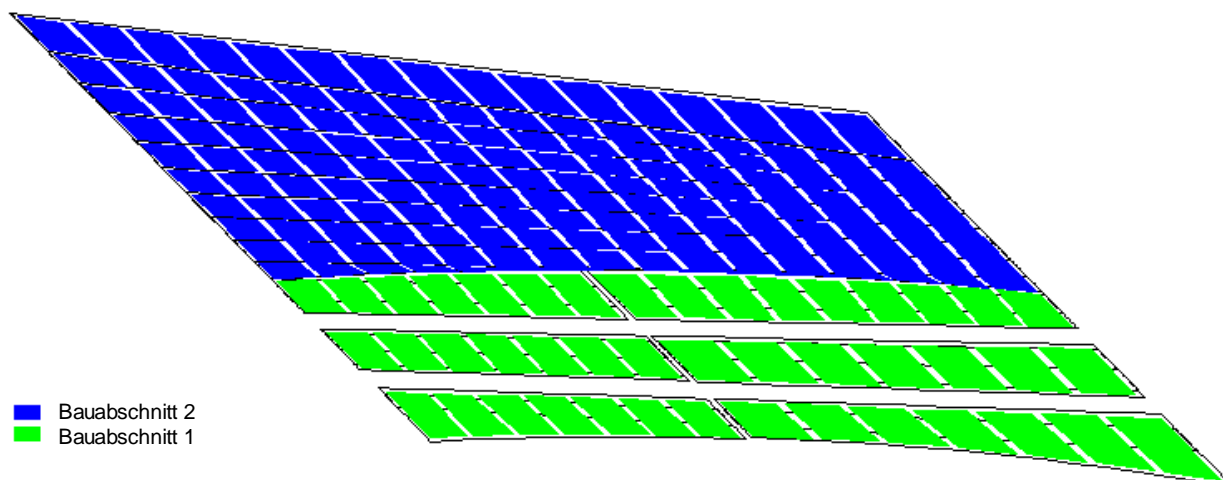


Bild 1: Übersicht mit Montagebaugruppen des 1. Bauabschnittes



Bild 2: Eisenbahnbrücke über die Holzmarktstraße, Bauzustand im Dezember 1996

2.2 Geometrische Besonderheiten

Die Lage der 16 Hauptträger wurde einerseits durch die geplante Gleislage im Endzustand bestimmt. Dadurch ergaben sich die Außenabmessungen des Überbaus im Endzustand. Andererseits erforderte die Fertigung in zwei Bauabschnitten unter Aufrechterhaltung des Verkehrs über zwei Gleise eine Trennung der Bauabschnitte in Brückenlängsrichtung. Durch die Gleislage im Bauzustand ergab sich eine kreisförmige Trennlinie mit einem Radius von 390 m. Unter der Maßgabe der späteren schnellen Verbindung beider Bauabschnitte sollten die Hauptträger die Bauabschnitte nicht kreuzen. Bei der extrem ungleichförmigen Grundrißgeometrie war unter den gegebenen Randbedingungen eine unregelmäßige Lage der Hauptträger nicht zu vermeiden. Unter dem Gesichtspunkt, daß diese Ungleichförmigkeit im Endzustand ästhetisch anspruchsvoll umgesetzt wird, wurde für die Hauptträgerabstände auf den Auflagerlinien der Widerlager gegenläufige quadratische Polynome gewählt. Zusätzlich bedingte der geringe Hauptträgerabstand an der südwestlichen Brückenecke eine maximale Untergurtbreite von 300 mm. Die durch die Durchfahrtshöhen und die Entwurfsgradienten bedingte geringe Bauhöhe erforderte über der Mittelstütze für diese Hauptträger größere Steifigkeiten, so daß die Untergurte mit variablen Breiten und mit Zulagen im Bereich des Mittelquerträgers ausgeführt wurden.

Die Anordnung der Querträger ergab sich aus der vorhandenen Widerlagergeometrie, welche über Vermessungsdaten in das CAD-Programm eingelesen wurden. Die nicht parallel liegenden Auflagerachsen des Bestandes wurden beibehalten. Die Lage des Mittelquerträgers wurde über den Schnittpunkt der Auflagerachsen und die Winkelhalbierende bestimmt. Die Festlegung der Lage der Normalquerträger erfolgte analog.

Als Eingangsdaten für das Berechnungsprogramm wurden direkt die geometrischen Daten der CAD-Bearbeitung verwendet. Die Querschnittsabmessungen aus der Berechnung gingen wiederum in die CAD-Bearbeitung ein. Über die Berechnungsmodelle wurde in [3] berichtet. Die Bemessung erfolgte gemäß DS 804 [1] sowie DAST Richtlinie 012 [2].

2.3 Konstruktion, Fertigung und Montage

Die Erstellung der CAD-Werkstattplanung erfolgte auf Grundlage der vorliegenden Ausführungsplanung. Unter Berücksichtigung der in der Fertigung handhabbaren maximalen Bauteilabmessungen, der Transport- und Montagemöglichkeiten sowie der komplizierten geometrischen Randbedingungen erfolgte die Teilung des 890 t schweren Tragwerkes in insgesamt 14 Bauteile mit einem Einzelgewicht von je 65 bis 85 t. Für die konstruktive Aufteilung in Einzelsegmente war die Herstellung der Brücke in zwei Bauabschnitte von besonderer Bedeutung. Der erste Bauabschnitt bestand aus sechs und der zweite aus acht Bauteilen. Bei der Erstellung der Werkstattunterlagen stellten die komplizierten, mehrdimensionalen Durchdringungen an

den Bauteilen End- und Mittelquerträger höchste Anforderungen an die Genauigkeit. Die aus der CAD-Bearbeitung gewonnenen geometrischen Abmessungen der Einzelbauteile - die Gesamtzahl der verschiedenen Einzelbleche betrug ca. 3500 - wurden auf direktem Weg in eine CNC gesteuerte Brennschneidemaschine eingelesen. Die so hergestellten Einzelteile wurden zu Einzelkomponenten vorgefertigt. In der Endmontage erfolgte das Zusammenfügen zu Montageeinheiten. Diese Einheiten wurden entsprechend der Bauabschnitte vollständig ausgelegt, angepaßt und verschweißt. Die geometrische Form des Bauwerkes erforderte auch beim Aufbau der notwendigen Hürdenstrecke den CAD Einsatz, um die ca. 900 Meßpunkte, welche sich aus der statischen Berechnung ergeben hatten, mit der erforderlichen Präzision einrichten zu können. Eine neuartige Anrißmethode, die Markierungen auf Einzelteilen während des Brennvorganges mit CAD-Exaktheit ermöglicht, erspart zusätzliche Meßaufwendungen und bildete die Basis für eine sehr gute Paßgenauigkeit der Bauteile untereinander und in der Gesamtheit als Tragwerk.

Die Maßhaltigkeit der Bauteile wurde durch eine Endvermessung dokumentiert. Die gewonnenen Ergebnisse fanden Verwendung bei den für die Montage notwendigen Meßblättern. Die Kontrolle der als x, y, z - Koordinaten vorliegenden Meßpunkte auf Soll-Ist Abweichungen wurde mittels Computer durchgeführt.

Das Auflegen der an den Altbestand angrenzenden Bauteile erfolgte weitaus problematischer als geplant. Durch den vorgegebenen Kurvenradius des Gleises 3 war eine geradlinige Trennung zwischen dem 1. und 2. Bauabschnitt nicht möglich. Die Kurvenform des neuen Fahrbahnbleches lag von der Abbruchkante des alten Hauptträgerobergurtes im kleinsten Abstand theoretisch nur 30 mm entfernt. Durch die vor Ort vorgefundene Realität ließen sich jedoch Anpassungsarbeiten an beiden Bauwerken nicht vermeiden.



Bild 3: Unteransicht des fertiggestellten 1. Bauabschnittes

Nach vollständiger Ausrichtung der einzelnen Bauteile erfolgte das Abschweißen in 2 getrennten Gassen. Danach wurde der Montagestoß östlich der Mittelpfeiler geschlossen. Zum Einsatz kam hierbei erstmals weitgehend das Innershield Verfahren.

Zu den abschließenden Hauptleistungen im Stahlbrückenbau zählt die Einlagerung des Tragwerkes in Verbindung mit der Lagermontage. Da es sich hierbei um ein statisch unbestimmt gelagertes Tragwerk handelt, war es notwendig, die reale Gewichtsverteilung des gesamten 1. Bauabschnittes im Endzustand zu ermitteln. Infolge der unregelmäßigen Anordnung der Lagerpunkte war eine Optimierung der Stützkraftverteilung unter Einhaltung vertikaler Lager toleranzen während der Einlagerung erforderlich. Die so erzielten Auflagerkräfte ermöglichten die Realisierung der in der Statik berechneten Lagerkräfte und damit ein dem Berechnungsmodell entsprechendes Tragverhalten.

3 Mauerwerksviadukt

Die Berliner Stadtbahn wird in weiten Abschnitten über gemauerte Ziegelsteinviadukte geführt. Zwischen den Bahnhöfen Hauptbahnhof und Zoo bestehen diese aus annähernd 600 gemauerten Gewölben aus den Jahren 1878 bis 1882. Der größte Teil dieser Gewölbe wurde in den 20er und 30er Jahren verstärkt. Dazu wurde ein zweites Gewölbe angeordnet, welches die Lasten über verbreiterte Pfeiler auf zusätzliche Sohlgewölbe überträgt.

Das Konzept der gegenwärtigen Sanierungsmaßnahmen sah neben der Anordnung einer lastverteilenden Platte einen Gleisaufbau als Feste Fahrbahn vor. Zusätzlich wurden die Gleisabstände den heutigen Bundesbahnvorschriften angepaßt. Die Gleisgradienten im Bauzustand verursachen im Bereich des Lehrter Stadtbahnhofs eine Lasterhöhung durch das Aufbringen von zusätzlichem Schotter mit einer Dicke von bis zu einem Meter. Aus diesen Gründen wurde eine genaue Nachrechnung der Stadtbahnviadukte unter Berücksichtigung der verschiedensten Parameter (z.B. Fugen in der lastverteilenden Platte, Rißbildung im Mauerwerk, Schubverformungen in Fugen zwischen Beton und Mauerwerk bei Überschreitung von Grenzwerten) erforderlich. Im Folgenden wird auf den östlichen Anschluß an den Zentralen Bereich am Lehrter Stadtbahnhof eingegangen.

3.1 Geometrie

Der östlich zum Lehrter Stadtbahnhof gelegene Viaduktbereich umfaßt gegenwärtig 27 Bögen (Bogen Nr. 261 bis 288) mit einer Gesamtlänge von ca. 324 m und einer Breite von etwa 15,4 m. Dieser Bogenbereich wird durch den Abbruch des Bogens 275 und Teilen der folgenden Bögen auf eine Länge über 14 Bögen gekürzt. Der Pfeiler zwischen den Bögen 274 und 275 wird zu einem Endpfeiler, wobei durch Anbetonieren eines Stahlbetonwiderlagers eine zusätzliche Abstützung erfolgt.

Während der o.g. Verstärkungsmaßnahmen erhielten die Urgewölbe (Dicke 64 cm, Stützweite 13,45 m, lichte Weite 12,00 m) einen gemauerten Verstärkungsbogen mit ebenfalls einer Dicke von 64 cm. Durch die Anordnung eines Sohlgewölbes und Pfeilerverbreiterungen aus Stahlbeton reduzierte sich die lichte Weite auf 10,40 m. In Querrichtung ist ein Längsdurchgang (Längsgewölbe im Urbogen) durch die Pfeiler mit einer Breite von 1,75 m vorhanden.

3.2 Berechnungsmodell

Die Berechnung erfolgt mittels finiter Elemente mit zwei Rechenmodellen. Es werden ebene Scheibenmodelle als 1 m - Streifen untersucht.

Das erste Modell dient der Ermittlung der Querverteilung über den Querschnitt im Pfeilerbereich unter Berücksichtigung der Längsöffnung.

Mit dem zweiten Modell wird die Spannungsermittlung der Stadtbahnbögen in Längsrichtung durchgeführt. Dieses Modell vernachlässigt die Querschnittsöffnung im Pfeilerbereich. Deshalb wird aus der Berechnung des Quersystems ein Lasterhöhungsfaktor gebildet, der für den Nachweis im Kämpferbereich verwendet wird.



Bild 4: Blick auf den Viaduktabschnitt Bogen 272 bis 274

Im Weiteren wird auf das Längssystem eingegangen.

Die Horizontalverformung im Endbereich einer unendlich langen Bogenreihe infolge einer ungleichförmigen Temperaturbelastung klingt in Abhängigkeit der Bogen- und Pfeilersteifigkeit relativ schnell ab. Deshalb wird zur Reduzierung des Berechnungsaufwandes von der 14 Bögen umfassenden Viaduktreihe ein Bereich von 4 ½ Bögen mit symmetrischer Lagerung im Rechenmodell berücksichtigt.

Für die unterschiedlichen Materialien wurden folgende Kennwerte verwendet

Bauteil	Mauerwerk	Magerbeton	Stahlbeton alt	Stahlbeton neu	Kies/Schotter
E-Modul [N/mm ²]	5000	1800	12000	30000	100
Wichte γ [kN/m ³]	19	20	25	25	20
α_t [1/K]	alle Bauteile $1 \cdot 10^{-5}$				

Da der Verstärkungsbogen nachträglich ohne spezielle Verbindung mit dem Urbogen ausgeführt wurde, erfolgte eine radiale Kopplung von Ur- und Verstärkungsbogen unter Berücksichtigung möglicher tangentialer Verschiebungen.

Die Pfeiler und unteren Verstärkungsbögen sind elastisch im Baugrund eingespannt. Der Baugrund wird durch diskretisierte Federn abgebildet. Die Steifigkeit dieser Federn wurde so gewählt, daß die im Pfeilerbereich der unteren Verstärkungsbögen vorhandenen Bohrpfähle sowie die tiefer gehenden Pfeilergründungen einen entsprechend größeren Wert erhielten.

Der maßgebende Bogen für die Druckbeanspruchung im Mauerwerk sowie für eine mögliche Rißbildung im Bogen infolge Eigengewicht, Verkehrsbelastung und Temperatur ist der Randbogen. Im Bogenbereich dieses Bogens wurde die Möglichkeit der Rißbildung vorgesehen. Die Modellierung der Risse erfolgte durch die Verbindung von finiten Elementen mit GAP-Elementen. Diese übertragen bei Druckbelastung die Beanspruchung und ermöglichen eine Verformung bei Zugbeanspruchung ohne die Übertragung der Zugkräfte. Zusätzlich wurde die radiale Schubübertragung in den rechnerischen Fugen durch Kopplung von Freiheitsgraden ermöglicht, um der praktisch vorhandenen Verzahnung möglicher Risse Rechnung zu tragen.

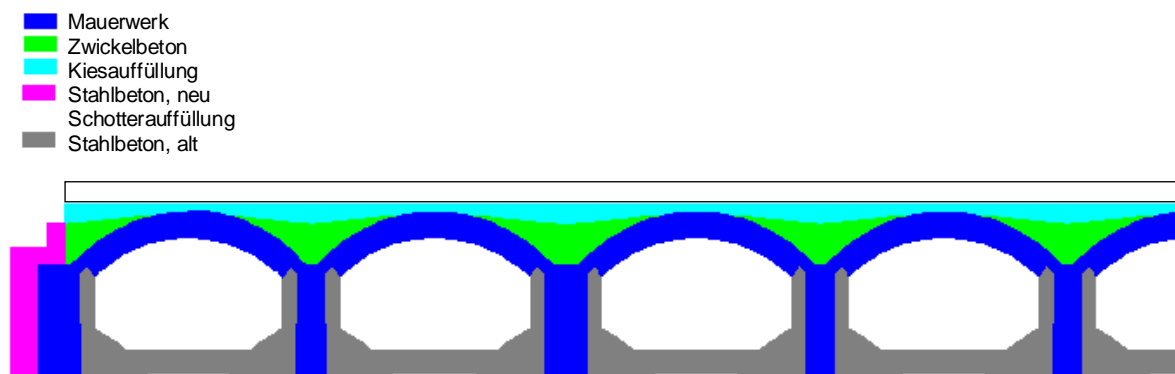


Bild 5: Berechnungsmodell des Bogenabschnittes

3.3 Ergebnisse

Als Ergebnis der Berechnung liegen neben den Spannungen und Verformungen der Bogenreihe unter Eigengewicht, Verkehr sowie Temperaturbelastung Aussagen zur möglichen Rißbildung, zu rechnerischen Rißbreiten sowie Angaben zur Spannungsumlagerung beim Auftreten von Rissen vor.

Die im Bild 6 angegebene Darstellung zeigt die Spannungen in Viaduktlängsrichtung unter Eigengewicht, Verkehrsbelastung im Randfeld sowie Temperaturänderung oberhalb der Geländeoberfläche als verformten, überhöht dargestellten Spannungsplot.

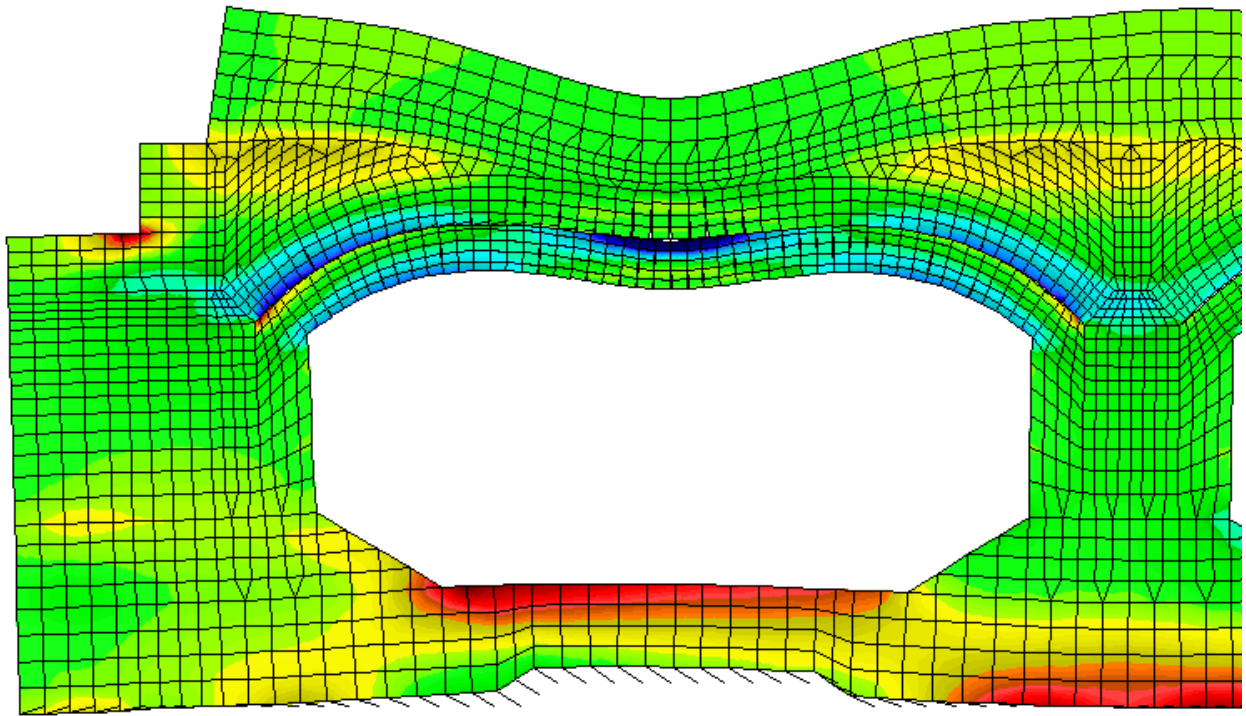


Bild 6: Druckspannungen σ_x im Randbogen infolge Verkehr, Eigengewicht und Temperatur unter Berücksichtigung der Rißbildung
 $\max \sigma_x = 1,33 \text{ N/mm}^2$
 $\min \sigma_x = -2,42 \text{ N/mm}^2$

Beteiligte

Bauherr: *Deutsche Bahn AG*

Entwurf, Ausschreibung und Ausführungsplanung:

Deutsche Eisenbahn-Consult Berlin; Krebs und Kiefer GmbH, Berlin; Arge Mittelstandgruppe

Architektonische Beratung: *Dörr-Ludolf-Wimmer, Jux & Partner*

Werkstattplanung EÜ Holzmarktstraße: *Schachtbau Nordhausen GmbH*

Statische Prüfung:

Dr.-Ing. Mündecke, Dipl.-Ing. Schmiedel, Dipl.-Ing. Hübsch, Prof. Dr.-Ing. Hering

Bauausführung: *ARGE Mittelstandsgruppe*

Bauüberwachung: *Deutsche Eisenbahn-Consult Berlin; Krebs und Kiefer GmbH, Berlin*

Literatur

- [1] Deutsche Bundesbahn, Vorschrift für Stählerne Eisenbahnbrücken und sonstige Ingenieurbauwerke, DS 804, Januar 1983
- [2] Deutscher Ausschuß für Stahlbau, Beulsicherheitsnachweis für Platten, DAST Richtlinie 012, Oktober 1978
- [3] *Schleicher, W.*: Zur Modellierung von Stahlbrücken in der Baupraxis, Finite Elemente in der Baupraxis, Stuttgart 1995
- [4] COSMOS/M, User Guide, Structural Research and Analysis Corporation, Santa Monica, California, Juni 1995